



TITLE:

Hydrodynamics of squirming locomotion at low Reynolds numbers(Abstract_要旨)

AUTHOR(S):

Ishimoto, Kenta

CITATION:

Ishimoto, Kenta. Hydrodynamics of squirming locomotion at low Reynolds numbers. 京都大学, 2015, 博士(理学)

ISSUE DATE:

2015-03-23

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k18770>

RIGHT:

(続紙 1)

京都大学	博 士 (理 学)	氏名	石本 健太
論文題目	Hydrodynamics of squirming locomotion at low Reynolds numbers (低レイノルズ数における微生物遊泳の流体力学)		
(論文内容の要旨)			
<p>流体中の微生物の遊泳では、低レイノルズ数流体の中で境界変形を伴う物体の運動として定式化できるものも多いが、境界変形と運動様態の関係は理論的扱いが困難なため、未解明の現象が多く残されている。石本氏の論文は、この分野で「帆立貝定理」として知られる基本定理を出発点にして、微生物の運動における慣性効果、境界効果、大振幅変形効果について理論的に調べたものである。</p> <p>微生物遊泳の理論解析では、微生物の慣性の効果はしばしば無視されてきた要素である。石本氏は本論文においてまず、この慣性の効果について、非定常ストークス方程式に従う流体中のスクワーマー (squirmer) モデルを用いた考察を行った。変形および慣性の効果が共に小さい場合に時間周期的な変形を行うスクワーマーを考え、長時間後の平均遊泳速度を漸近展開によって導いた。その結果は、往復変形では流体中の移動ができない、とする帆立貝定理は、慣性効果によって破られること、さらに慣性効果は繊毛波の波数 1 の変形に対して大きく現れることを示している。特に後者の慣性効果は、ミジンコや小型昆虫など、振動レイノルズ数が無視できない生物にみられる羽ばたき運動に対応すると考えられる。また遊泳効率の最適化による運動形態の選択を念頭に、簡略化されたスクワーマーに対して、一定のエネルギー消費量の下で遊泳効率を最適化する変形を調べ、慣性効果の増加とともに、最適な変形が波状から羽ばたき状に変化することを見出している。</p> <p>本論文では次に、微生物観察が多く顕微鏡下で行われることを念頭において、スライドグラスなどの境界の存在が遊泳に与える影響を調べている。無限平面境界付近を遊泳する微生物の運動を、楕円体のスクワーマーを用いて楕円体の表面で速度を与えることでモデル化し解析した。スクワーマーの運動を、平面からの距離とスクワーマーの傾斜角を変数とする 2 次元の力学系に帰着させ、ストークス流れを境界要素法による数値計算によって求めることで、力学系のダイナミクスを調べた。遊泳の定性的性質を、平面境界における境界条件・生物の形状・遊泳パターンにより分類し、バクテリアや精子に見られる境界付近での凝集現象が、力学系の安定固定点として理解できることを示した。</p> <p>本論文ではさらに、体積を保存する変形物体の遊泳問題を境界要素法によって数値的に扱い、Lighthill の漸近理論の検証、および繊毛波パターンの変形を行うスクワーマーについて遊泳効率を調べている。その結果、小振幅や高波数の変形では、Lighthill の漸近理論によって記述可能であるが、低波数の変形に対しては、Lighthill の理論からのずれが大きいこと、また特に、最高の遊泳効率は低波数・大変形のアメーバ様の運動によって与えられることを見出している。後者の結果は形状の大変形を伴う微生物にアメーバ様の運動形態が現れることを示唆するものである。</p> <p>以上のように、本論文は、低レイノルズ数流体中の微生物遊泳について、スクワーマーモデルの漸近解析および数値解析を用いて、微生物の慣性・境界・大変形の効果を調べ、その結果を用いて、遊泳効率を最適化する形状変形、および、平面境界付近における微生物凝集の有無を論じたものである。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、微生物の運動を、低レイノルズ数のニュートン流体中において変形を伴う物体の運動として定式化し、漸近解析および数値解析を用いて調べたものである。微生物の運動には、定常ストークス流れの中で往復変形する物体は変形の一周期で正確に元の位置に戻るため進むことができない、とする「帆立貝定理」が存在し非常に強い制約を与えている。このため現実の微生物は、往復変形ではない変形や流体運動の非定常性の利用などによる移動手段を採用しているが、長い進化過程を通じて選ばれた手段は、力学的にも洗練されたものであることが期待され、その解明は流体力学の観点からも重要な課題である。しかし、この問題は、移動境界をもつ物体と流れの相互作用という複雑な問題を伴い、数値的にも複雑な状況を扱わなければならないため、現在でもケーススタディの域を超えることが困難な問題として残されている。

石本氏の本論文はこの微生物の運動形態について、まず、Lighthillが提案したスクワーマー (squirmer) モデルを用いて、変形の大きさと振動レイノルズ数による漸近展開により、微生物の平均速度の漸近形を導いている。この漸近展開は複雑で多量の計算を必要とするものであるが、得られた漸近形は多くの情報を含む有用な表式であり、その導出はこの計算を実行した計算力とともに高く評価されるものである。特に振動レイノルズ数の一次の項が消えないことは、帆立貝定理が流れの非定常性の効果によって破れることを示している点で重要である。また石本氏はこのようなスクワーマーに対して、遊泳に必要なエネルギー消費量を一定とする場合、振動レイノルズ数が大きくなるにつれ、平均速度を最大化する形状変形が波状変形から羽ばたき状変形に変化することを見出している。この結果は、もともと振動レイノルズ数がゼロの時に帆立貝定理によって無効とされていた羽ばたき状変形が、振動レイノルズ数の増加と共にもっとも有効な形状変形となることを示しており、その意外性が注目される結果である。

また石本氏は、微生物運動への平面境界の効果を、スクワーマーモデルを用いて力学系的な視点から調べ、形状変形の様態やスクワーマーのアスペクト比によって、平面境界から一定の距離にある面にスクワーマーが近づくかどうかを議論している。その結果は、現実の微生物でみられる平面境界付近への凝集現象に対応しており、一般性の高い議論となっている。このような現象を力学系的視点から捉えた研究は新しく、流体力学的議論と力学系的視点を組み合わせた点でも高く評価できるものである。

本論文ではさらに、体積を保存する変形物体に対して、境界要素法を用いた数値実験を行い、遊泳運動に関するLighthill の漸近理論との比較が行われている。Lighthill 理論は小振幅・高波数変形に対してよい記述を与えるものの低波数変形に対しては不一致が大きくなること、また、最高の遊泳効率が低波数・大変形のアメーバ状運動によって与えられることが見出されており、漸近理論の枠を超える優れた結果として注目される。

よって、本論文は博士(理学)の学位論文として価値あるものと認める。また、平成27年1月19日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行った結果、合格と認めた。

要旨公表可能日： 年 月 日以降